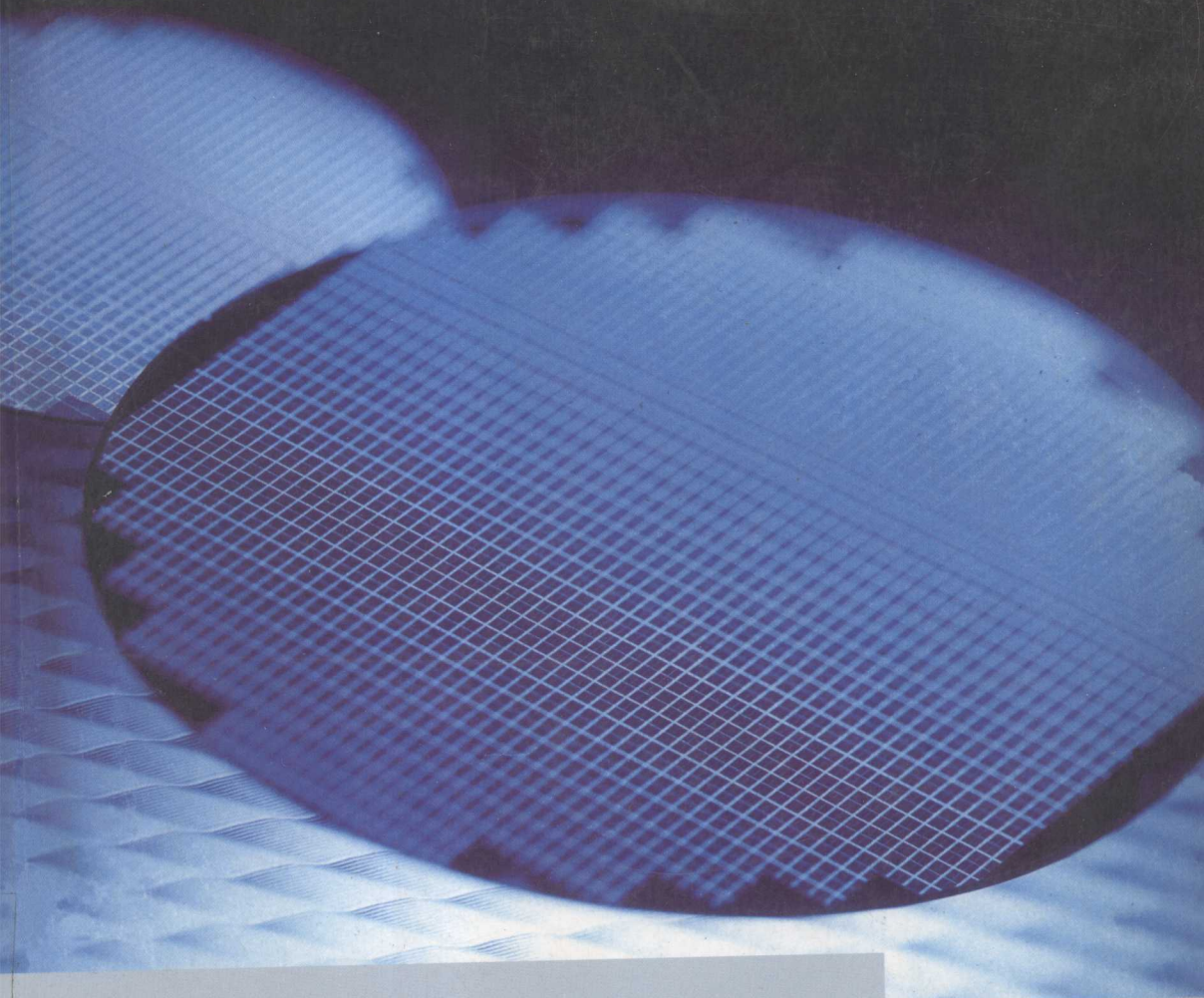


# 半导体技术

Semiconductors



技术阐述、工艺和特征数据



探索未来 永无止境

江南大学图书馆



91084098

TN3/09

Semiconductors

半 导 体 技 术

(技术阐述、工艺和特征数据)

英飞凌科技公司 著

吴志红 李逾晖 译

本书的撰写非常仔细,但作者和印刷商不能担保内容绝无错误。对可能存在的缺漏和错误作者和印刷商均无承担责任的义务。本书的某些术语享有注册商标,任何第三方未经许可擅自使用这些注册商标都属于侵权行为。

中文版 2004: A19100 - L531 - B711 - X - 5D00

根据“Semiconductors, 2<sup>nd</sup> English edition, 2004”由吴志红、李逾晖译

(德文第三版: Halbleiter, A19100 - L531 - B855)

(英文第二版: Semiconductors, A19100 - L531 - X - 7600)

© 2004 英飞凌科技公司,慕尼黑,德国

本书及其所有部分受到版权的保护。版权所有。

禁止任何在版权法律的严格规定之外的未经作者许可的情况下使用本书,否则将受到依法追究。严禁翻版、翻译、缩微拍摄或进行其他处理以及储存和用电子系统处理。以上规定亦适用于正文的摘取章节。

中国印刷

# 前 言

亲爱的读者：

我们用一句真理来为本书作序：只有真正的新才是新。这本新版的《半导体技术》的面世源于两个迫切的需求。一方面，不断涌现和成长的电子电气工程师以及教师和广大用户应能便于了解掌握微电子领域的知识。这本已迅速成为业界行家圈内的权威之作，也非常适于作为经典的教材、可靠的专业参考手册以及激发思维的读物。

另一方面，您不仅可以在本书中找到来自“昨天”的不可或缺的基础知识，比如从字母 A 起始的 A/D 转换器到字母 Z 起始的齐纳(Zener)效应，您都可从相应的章节中获得深入的知识，或者通过直接快速浏览书后的术语表获得概要的了解，而且我们为读者提供了真正新的内容：半导体技术最新的趋势、推动力和发展状况。

然而，说总是比做起来容易。大家可以想一下摩尔定律。英特尔的创始人之一戈登·摩尔在 1965 年预言 IC 中集成的晶体管数量大约每 18 个月增长一倍。现今的情况证明他的说法是正确的。今天，一片 IC 上的元件数量是 40 年前的四千万倍。到 2085 年，我们的推算会超越想象的极限吗？那时候会出现只由半个原子构成的元件吗？

这只是个猜想，我们可以留给未来学家。当前的事实是，半导体行业是现今世界中发展最快的行业，无论是在通信还是在汽车工业，以及相关的宽带与接入技术、移动通信技术和存储器领域都是如此。

因此，在未来几年到几十年中，随着信息和通信领域不断发生革新，我们和《半导体技术》这本书的内容也需要与时俱进，不断更新。这些相关的革新即使在今天也能从以下这些事实中看出：世界上三分之一的安全气囊产品中都使用英飞凌的芯片，每两个 GSM 移动电话中都装有我们的元件。每六台电脑、每五台服务器之一都安装着我们的内存产品。

如果我们的这本书能对您的发展有所帮助，我们将深感欢欣。

探索未来，永无止境！

英飞凌科技公司  
2004 年 9 月于慕尼黑

# 目 录

|                                                 |    |
|-------------------------------------------------|----|
| 1 半导体基础和历史回顾 .....                              | 1  |
| 1.1 简介 .....                                    | 1  |
| 1.2 历史回顾 .....                                  | 1  |
| 1.2.1 半导体二极管 .....                              | 1  |
| 1.2.2 双极型晶体管 .....                              | 2  |
| 1.2.3 硅的成功之路 .....                              | 2  |
| 1.2.4 其他半导体材料和元件 .....                          | 3  |
| 1.2.5 场效应晶体管 .....                              | 4  |
| 1.2.6 半导体集成电路 .....                             | 5  |
| 1.2.7 半导体元件的分类 .....                            | 9  |
| 1.3 集成电路的设计和功能 .....                            | 10 |
| 1.3.1 双极型集成电路 .....                             | 10 |
| 1.3.2 MOS 集成电路 .....                            | 17 |
| 1.4 其他半导体元件 .....                               | 24 |
| 1.4.1 普通结构的半导体模块 .....                          | 24 |
| 1.4.2 半导体二极管 .....                              | 25 |
| 1.4.3 晶体管 .....                                 | 28 |
| 1.4.4 其他集成半导体器件 .....                           | 29 |
| 2 二极管和晶体管 .....                                 | 31 |
| 2.1 高频二极管 .....                                 | 31 |
| 2.2 载流子寿命和高频 PIN 型二极管的串联等效电阻 .....              | 32 |
| 2.2.1 如何测量 PIN 型二极管的电气参数 .....                  | 34 |
| 2.3 双极型晶体管的电容定义 .....                           | 35 |
| 2.3.1 如何测量 $C_{cb}$ , $C_{cc}$ 和 $C_{cb}$ ..... | 36 |
| 2.4 用三参数测量法定义小信号射频晶体管 .....                     | 37 |
| 2.4.1 S 参数的测量 .....                             | 37 |
| 2.4.2 确定晶体管噪声系数的测量方法 .....                      | 38 |
| 2.4.3 确定混频器噪声系数的测量方法 .....                      | 39 |
| 2.4.4 测量 IP3 的值(3 阶截止点) .....                   | 39 |
| 2.5 双极型射频晶体管 .....                              | 41 |
| 2.5.1 SIEGET: 倒立之物 .....                        | 41 |

---

|       |                          |     |
|-------|--------------------------|-----|
| 2.5.2 | 应用                       | 44  |
| 2.5.3 | 硅锗晶体管                    | 45  |
| 2.6   | 硅单片微波集成电路(MMIC)简化射频电路的开发 | 45  |
| 2.6.1 | 三种应用电路                   | 48  |
| 2.6.2 | 移动电话并非唯一应用对象             | 50  |
| 2.7   | 使用 BCR 400 工作点稳定器稳定电流    | 50  |
| 2.7.1 | 工作方式                     | 51  |
| 2.7.2 | 控制响应                     | 51  |
| 3     | 功率半导体                    | 54  |
| 3.1   | 分类                       | 54  |
| 3.1.1 | 根据参数对功率半导体进行分类           | 56  |
| 3.2   | 产品的开发                    | 57  |
| 3.2.1 | 产品开发的差异                  | 58  |
| 3.3   | 产品群组                     | 59  |
| 3.4   | 晶元技术(前道)                 | 60  |
| 3.4.1 | 基本工艺                     | 60  |
| 3.4.2 | 功率 MOSFET                | 61  |
| 3.4.3 | 智能型场效应晶体管(FET)           | 62  |
| 3.4.4 | 智能功率集成电路                 | 65  |
| 3.4.5 | 前景和趋势                    | 69  |
| 3.5   | 封装技术(后道)                 | 70  |
| 3.5.1 | 半导体封装的分类                 | 70  |
| 3.5.2 | 功率封装的静态特性                | 71  |
| 3.5.3 | 功率封装的动态特性                | 73  |
| 3.5.4 | 用有限元法分析功率半导体封装           | 78  |
| 3.5.5 | “热学和封装信息”数据表             | 81  |
| 3.5.6 | 在汽车应用中的功率半导体封装具有的特殊产品特性  | 82  |
| 3.5.7 | 多芯片封装及趋势                 | 85  |
| 3.6   | 汽车功率器件                   | 87  |
| 3.6.1 | MOSFET 和 IGBT            | 87  |
| 3.6.2 | 智能场效应管和智能 IGBT           | 89  |
| 3.6.3 | 多通道开关                    | 95  |
| 3.6.4 | 桥式电路                     | 97  |
| 3.6.5 | 供电集成电路                   | 102 |
| 3.6.6 | 收发器                      | 107 |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 3.6.7 智能功率系统集成电路 .....       | 111 |
| 3.6.8 汽车应用中的发展趋势 .....       | 115 |
| 3.7 电源和传动中的应用 .....          | 116 |
| 3.7.1 开关电源——电路拓扑和产品 .....    | 116 |
| 3.7.2 开关电源的电路拓扑 .....        | 119 |
| 3.7.3 开关电源的选用标准 .....        | 121 |
| 3.7.4 开关电源集成电路 .....         | 123 |
| 3.7.5 功率因数 .....             | 129 |
| 3.7.6 传动-转速控制和电力电子 .....     | 134 |
| 3.7.7 低压功率晶体管:OptiMOS™ ..... | 137 |
| 3.7.8 高压晶体管:CoolMOS™ .....   | 144 |
| 3.7.9 碳化硅-高功率密度的基础 .....     | 149 |
| 3.7.10 高压功率 IGBT .....       | 159 |
| 4 光半导体 .....                 | 166 |
| 4.1 光辐射的物理原理 .....           | 166 |
| 4.1.1 基本原理和术语 .....          | 166 |
| 4.1.2 光电二极管 .....            | 168 |
| 4.1.3 硅光电二极管 .....           | 169 |
| 4.1.4 光电晶体管 .....            | 170 |
| 4.1.5 发光二极管 .....            | 171 |
| 4.2 半导体激光 .....              | 174 |
| 4.2.1 半导体激光的基本原理 .....       | 174 |
| 4.2.2 带状氧化物激光器的结构 .....      | 176 |
| 4.2.3 激光阵列 .....             | 177 |
| 4.2.4 半导体激光的深层应用 .....       | 180 |
| 4.3 光电耦合器与固态继电器 .....        | 181 |
| 4.4 光波导 .....                | 183 |
| 4.4.1 光纤——一种传输介质 .....       | 183 |
| 4.4.2 光波导应用中的发送与接收模块 .....   | 185 |
| 4.4.3 光波导应用中的异频雷达收发器 .....   | 187 |
| 4.4.4 玻璃光纤的连接 .....          | 188 |
| 4.4.5 塑料光纤的耦合单元 .....        | 189 |
| 4.4.6 塑料光纤的典型应用 .....        | 189 |
| 4.4.7 车辆中塑料光纤的光传输技术的应用 ..... | 190 |
| 4.5 IrDA——应用红外线辐射的数据传输 ..... | 194 |



|                                       |            |
|---------------------------------------|------------|
| 4.5.1 IrDA——所有设备的一个世界性标准 .....        | 195        |
| 4.5.2 IrDA 整体标准 .....                 | 195        |
| <b>5 传感器 .....</b>                    | <b>197</b> |
| 5.1 概况 .....                          | 197        |
| 5.2 磁场传感器 .....                       | 197        |
| 5.2.1 分立霍尔效应传感器 .....                 | 197        |
| 5.2.2 集成霍尔传感器 ASIC .....              | 201        |
| 5.2.3 巨磁电阻(GMR) .....                 | 204        |
| 5.3 压力传感器 .....                       | 211        |
| 5.3.1 表面微加工技术,数字输出的压力传感器(KP100) ..... | 211        |
| 5.3.2 模拟输出的压力传感器(KP120) .....         | 213        |
| 5.3.3 采用 SMD 封装(KP200)的压电传感器 .....    | 215        |
| 5.4 温度传感器 .....                       | 216        |
| <b>6 存储器 .....</b>                    | <b>218</b> |
| 6.1 数据存储的类型 .....                     | 218        |
| 6.1.1 机械存储技术 .....                    | 218        |
| 6.1.2 磁存储技术 .....                     | 218        |
| 6.1.3 光存储技术 .....                     | 219        |
| 6.1.4 半导体存储技术(存储器) .....              | 219        |
| 6.2 DRAM 的基本原理和应用领域 .....             | 220        |
| 6.2.1 SRAM 和 DRAM 是什么 .....           | 220        |
| 6.2.2 DRAM 的类型 .....                  | 221        |
| 6.2.3 规格 .....                        | 222        |
| 6.2.4 DRAM 的机械结构 .....                | 222        |
| 6.2.5 DRAM 的功能(以 SDR SDRAM 为例) .....  | 223        |
| 6.2.6 工艺技术 .....                      | 225        |
| 6.2.7 DRAM 的内部结构和功能原理 .....           | 228        |
| 6.2.8 DRAM 的开发和生产 .....               | 235        |
| 6.2.9 质量保证 .....                      | 237        |
| 6.3 如何使 DRAM 变得更快 .....               | 239        |
| 6.3.1 EDO-DRAM 加速存储器访问 .....          | 240        |
| 6.3.2 同步工作更快 .....                    | 240        |
| 6.3.3 双倍数据传输率 .....                   | 241        |
| 6.3.4 模块简化存储器的升级 .....                | 241        |



|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| <b>7 微控制器</b> .....           | 244 |
| 7.1 简介 .....                  | 244 |
| 7.2 8 位的微控制器 .....            | 244 |
| 7.2.1 简介 .....                | 244 |
| 7.2.2 存储器结构 .....             | 244 |
| 7.2.3 特殊功能寄存器区 .....          | 247 |
| 7.2.4 CPU 体系结构 .....          | 248 |
| 7.2.5 基本中断处理 .....            | 250 |
| 7.2.6 I/O 口结构 .....           | 252 |
| 7.2.7 CPU 时钟周期 .....          | 254 |
| 7.2.8 外部存储器访问 .....           | 255 |
| 7.2.9 指令集概况 .....             | 256 |
| 7.2.10 C500 微控制器框图 .....      | 263 |
| 7.3 16 位微控制器 .....            | 265 |
| 7.3.1 简介 .....                | 265 |
| 7.3.2 16 位微控制器家族成员 .....      | 266 |
| 7.3.3 C166 家族体系结构概况 .....     | 268 |
| 7.3.4 存储器组织结构 .....           | 268 |
| 7.3.5 基本 CPU 概念和优化方法 .....    | 269 |
| 7.3.6 片上系统资源 .....            | 274 |
| 7.3.7 外部总线接口 .....            | 275 |
| 7.3.8 片上外围模块 .....            | 276 |
| 7.3.9 电源管理监控特性 .....          | 283 |
| 7.3.10 XC166 家族的特性 .....      | 283 |
| 7.3.11 指令集总结 .....            | 284 |
| 7.3.12 16 位微控制器的框图 .....      | 287 |
| 7.4 32 位 TriCore 体系结构 .....   | 292 |
| 7.4.1 TriCore 体系结构的特性概述 ..... | 292 |
| 7.4.2 程序状态寄存器 .....           | 293 |
| 7.4.3 数据类型 .....              | 294 |
| 7.4.4 寻址模式 .....              | 294 |
| 7.4.5 指令格式 .....              | 294 |
| 7.4.6 任务及上下文 .....            | 294 |
| 7.4.7 中断系统 .....              | 296 |
| 7.4.8 陷阱系统 .....              | 296 |

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| 7.4.9 保护系统 .....              | 296        |
| 7.4.10 复位系统.....              | 297        |
| 7.4.11 调试系统.....              | 297        |
| 7.4.12 编程模式.....              | 297        |
| 7.4.13 存储模式.....              | 300        |
| 7.4.14 寻址模式.....              | 300        |
| 7.4.15 内核寄存器.....             | 302        |
| 7.4.16 通用寄存器(GPR) .....       | 304        |
| 7.4.17 32 位微控制器的框图 .....      | 307        |
| <b>8 智能卡 .....</b>            | <b>309</b> |
| 8.1 概况 .....                  | 309        |
| 8.2 简介 .....                  | 309        |
| 8.3 市场 .....                  | 309        |
| 8.3.1 智能卡 IC 的应用市场 .....      | 310        |
| 8.3.2 市场要求 .....              | 310        |
| 8.4 应用 .....                  | 310        |
| 8.4.1 数字签名——未来的签名方式 .....     | 311        |
| 8.4.2 电子商务——因特网上的世界经济体系 ..... | 312        |
| 8.4.3 家庭银行 .....              | 312        |
| 8.5 商业关系网 .....               | 312        |
| 8.6 产品 .....                  | 313        |
| 8.6.1 “卡上芯片”——最新技术代表 .....    | 313        |
| 8.6.2 “卡上系统”——未来的挑战 .....     | 314        |
| 8.7 加密技术 .....                | 315        |
| 8.8 多功能卡的芯片 .....             | 316        |
| 8.8.1 英飞凌高端微控制器系列的解释器支持 ..... | 317        |
| 8.9 “人卡交互接口”——一种新的外围设备 .....  | 317        |
| 8.10 工艺和生产.....               | 318        |
| 8.10.1 前沿工艺技术.....            | 318        |
| 8.10.2 工艺、产品和设计要求 .....       | 319        |
| 8.10.3 生产要求.....              | 319        |
| 8.11 安全性.....                 | 319        |
| 8.11.1 作为安全系统的智能卡.....        | 319        |
| 8.11.2 硬件安全性.....             | 320        |
| 8.11.3 安全金字塔.....             | 320        |

|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| 8.11.4 安全性作为技术和组织上的挑战 .....    | 320        |
| 8.12 前景 .....                  | 320        |
| <b>9 汽车半导体解决方案 .....</b>       | <b>322</b> |
| 9.1 汽车电子 .....                 | 322        |
| 9.2 车身电子 .....                 | 323        |
| 9.2.1 车辆供电控制器和车灯控制模块 .....     | 323        |
| 9.2.2 车门控制模块 .....             | 327        |
| 9.2.3 空调系统 .....               | 329        |
| 9.3 安全电子 .....                 | 332        |
| 9.3.1 主动安全系统 .....             | 335        |
| 9.3.2 被动安全系统 .....             | 339        |
| 9.4 动力总成电子 .....               | 348        |
| 9.4.1 动力总成控制环中的半导体技术 .....     | 349        |
| 9.4.2 动力总成应用——系统概况 .....       | 349        |
| 9.4.3 动力总成应用的未来分配 .....        | 356        |
| 9.5 信息娱乐电子 .....               | 356        |
| 9.5.1 汽车仪表板/仪器组 .....          | 356        |
| 9.5.2 汽车音频 .....               | 356        |
| 9.5.3 远程信息处理系统 .....           | 357        |
| 9.5.4 导航系统 .....               | 358        |
| 9.5.5 多媒体系统 .....              | 358        |
| 9.5.6 交叉应用技术 .....             | 359        |
| 9.6 新的 42 V 车辆供电系统 .....       | 361        |
| 9.6.1 12 V 和 42 V 术语的定义 .....  | 361        |
| 9.6.2 42 V 供电系统新的解决方案 .....    | 361        |
| 9.6.3 42 V 电源及其对功率半导体的影响 ..... | 364        |
| 9.7 线控技术的挑战与机遇 .....           | 370        |
| 9.7.1 系统和设计要求 .....            | 371        |
| 9.7.2 线控技术的可行性 .....           | 372        |
| 9.7.3 线控系统的半导体概念 .....         | 374        |
| 9.8 汽车电子的未来 .....              | 375        |
| <b>10 信息娱乐电子 .....</b>         | <b>377</b> |
| 10.1 宽带通信的起飞 .....             | 377        |
| 10.1.1 有线电视的数字化 .....          | 378        |
| 10.1.2 迅速发展的地面数字电视 .....       | 379        |

|         |                                      |     |
|---------|--------------------------------------|-----|
| 10.1.3  | 数字卫星广播反馈的改进                          | 381 |
| 10.2    | 多媒体卡(MMC)——移动终端设备理想的大容量存储器           | 382 |
| 10.2.1  | 各种应用                                 | 384 |
| 10.2.2  | 标准化的兴起                               | 384 |
| 10.2.3  | 灵活的接口                                | 384 |
| 10.2.4  | 2001 年达到 128 M 字节                    | 385 |
| 11      | 通信模块                                 | 387 |
| 11.1    | 概况和趋势                                | 387 |
| 11.1.1  | 战略目标                                 | 388 |
| 11.1.2  | 高速的创新                                | 388 |
| 11.1.3  | 交换集成电路                               | 388 |
| 11.1.4  | 网络集成电路                               | 389 |
| 11.1.5  | 通信终端集成电路                             | 389 |
| 11.2    | ISDN: 从交换机到用户                        | 390 |
| 11.2.1  | ISDN 中的功能模块                          | 390 |
| 11.2.2  | 数字线路卡                                | 393 |
| 11.2.3  | 扩展型线路卡控制器(ELIC)                      | 393 |
| 11.2.4  | ISDN-D 信道交换控制器(IDEK)                 | 393 |
| 11.2.5  | 适用于模拟前端的 U 型收发机                      | 394 |
| 11.2.6  | ISDN 高压电源控制器(IHPC)                   | 394 |
| 11.2.7  | 网络终端                                 | 395 |
| 11.2.8  | 智能网络终端控制器(INTC)                      | 396 |
| 11.2.9  | ISDN DC-DC 变换器(IDDC)                 | 396 |
| 11.2.10 | ISDN-S 接口的馈电电路(ISFC)                 | 396 |
| 11.2.11 | 双信号处理编码解码滤波器                         | 398 |
| 11.3    | ISDN 终端设备: 用户端                       | 398 |
| 11.3.1  | 电话机                                  | 398 |
| 11.3.2  | PC 机插卡                               | 400 |
| 11.3.3  | 终端适配器(TA)和 USB-S <sub>0</sub> 适配器    | 400 |
| 11.3.4  | NT1 和 TA 的组合                         | 401 |
| 11.3.5  | 带 USB-S <sub>0</sub> 适配器和 TA 功能的高端电话 | 401 |
| 11.4    | ISDN 的参考设计                           | 402 |
| 11.4.1  | 完善的解决方案将加速市场开发                       | 402 |
| 11.4.2  | 硬件                                   | 403 |
| 11.4.3  | 软件                                   | 403 |

---

|         |                                     |     |
|---------|-------------------------------------|-----|
| 11.4.4  | ISDN 接入 .....                       | 403 |
| 11.4.5  | ISDN 电话 .....                       | 404 |
| 11.5    | 电话网络的质量分析 .....                     | 405 |
| 11.5.1  | 针对每种电话网络的 TIQUS .....               | 405 |
| 11.5.2  | 呼叫测试:测试连接 .....                     | 405 |
| 11.5.3  | 英飞凌的 ISDN 接入技术 .....                | 406 |
| 11.6    | 灵活的芯片概念降低 PBX 成本 .....              | 407 |
| 11.6.1  | 高性价比的系统解决方案 .....                   | 407 |
| 11.6.2  | 尺寸减小的趋势 .....                       | 407 |
| 11.6.3  | 为数字 PBX 特制的集成电路 .....               | 408 |
| 11.6.4  | PCM 交换解决方案 .....                    | 409 |
| 11.6.5  | 使用 SWITI 与 H.100/H.110 总线连接 .....   | 410 |
| 11.7    | 移动终端设备的下一代结构体系——GSM 的 GOLD 未来 ..... | 411 |
| 11.7.1  | E-GOLD——扩展的 GOLD 标准 .....           | 412 |
| 11.7.2  | 应用支持 .....                          | 412 |
| 11.7.3  | 未来已经开始 .....                        | 413 |
| 11.7.4  | GSM 模块 .....                        | 413 |
| 11.8    | 数字应答机 .....                         | 414 |
| 11.8.1  | DSP 减少数据量 .....                     | 414 |
| 11.8.2  | 单信道编解码器已足够 .....                    | 415 |
| 11.8.3  | SAM 提供了优化的成本 .....                  | 416 |
| 11.8.4  | 开发变得易行 .....                        | 419 |
| 11.9    | 免提算法 .....                          | 419 |
| 11.9.1  | 免提系统 .....                          | 420 |
| 11.9.2  | 全双工系统 .....                         | 420 |
| 11.9.3  | 半双工系统 .....                         | 420 |
| 11.9.4  | 回音消除(全双工系统) .....                   | 420 |
| 11.9.5  | ITU-T 推荐标准 .....                    | 424 |
| 11.10   | DSL 体系结构 .....                      | 424 |
| 11.10.1 | DSL 的基本概念 .....                     | 425 |
| 11.10.2 | 利用环境的非对称性 .....                     | 426 |
| 11.10.3 | VDSL 传递视频数据,提供更高的带宽 .....           | 431 |
| 12      | 用户定制集成电路 .....                      | 433 |
| 12.1    | 半定制集成电路 .....                       | 433 |
| 12.1.1  | 门阵列 .....                           | 434 |

|        |                         |     |
|--------|-------------------------|-----|
| 12.1.2 | 单元设计                    | 434 |
| 12.1.3 | 采用门阵列还是单元设计             | 435 |
| 12.2   | 工艺技术                    | 435 |
| 12.2.1 | 双极型半定制集成电路              | 435 |
| 12.2.2 | CMOS 半定制集成电路            | 436 |
| 12.2.3 | 双极型门阵列                  | 437 |
| 12.2.4 | 双极型晶体管阵列(线性阵列)          | 438 |
| 12.3   | 封装变体                    | 438 |
| 12.4   | 用户定制集成电路制造商的合作          | 439 |
| 13     | 电磁兼容性——EMC              | 441 |
| 13.1   | 基本概念                    | 441 |
| 13.1.1 | EMC 现象                  | 441 |
| 13.1.2 | EMC:标准和规范               | 444 |
| 13.1.3 | 集成电路(IC)的 EMC 测量方法      | 445 |
| 13.1.4 | 确定元件 ESD 坚固性的模型         | 453 |
| 13.2   | 汽车功率集成电路的电磁兼容性          | 456 |
| 13.2.1 | 功率开关集成电路                | 456 |
| 13.2.2 | DC-DC 变换器的干扰发射          | 459 |
| 13.2.3 | 通信集成电路——CAN 的干扰发射       | 461 |
| 13.2.4 | 汽车功率开关 IC 的抗干扰性         | 462 |
| 13.2.5 | 通信集成电路——CAN 的抗干扰性       | 463 |
| 13.2.6 | 应用电路的 EMC 措施——外部元件      | 464 |
| 13.3   | 微控制器的电磁兼容性              | 465 |
| 13.3.1 | 汽车微控制器系统和技术发展趋势         | 465 |
| 13.3.2 | EMC 优化的电路板设计            | 467 |
| 13.3.3 | 来自微控制器的干扰发射的测量          | 470 |
| 13.3.4 | 微控制器的抗干扰性               | 475 |
| 13.4   | 有线通信的 EMC 目标            | 475 |
| 13.4.1 | 系统、元件和基本原则              | 476 |
| 13.4.2 | 高速 PCB 的设计——信号完整性(SI)   | 477 |
| 13.5   | 处理中的 ESD 保护措施           | 485 |
| 13.5.1 | 针对带电物体(人/机器)的保护措施       | 486 |
| 13.5.2 | 针对带电器件的保护措施             | 486 |
| 14     | 封装                      | 488 |
| 14.1   | 从物理学到创新——封装技术开发的重要性日益显著 | 488 |

---

|                                   |            |
|-----------------------------------|------------|
| 14.2 半导体芯片封装——概况.....             | 489        |
| 14.3 封装技术发展的推动力.....              | 491        |
| 14.4 世界范围封装技术的发展.....             | 492        |
| 14.4.1 标准化.....                   | 492        |
| 14.4.2 世界趋势:存储器封装 .....           | 492        |
| 14.4.3 世界趋势:集成电路封装 .....          | 493        |
| 14.4.4 世界趋势:无源模块 .....            | 495        |
| 14.5 客户的可用性:精密间距和多选择 .....        | 496        |
| 14.6 集成电路封装的发展道路——旅程将把我们带向何方..... | 496        |
| 14.7 材料的方面.....                   | 498        |
| 14.7.1 无铅、无卤素封装 .....             | 498        |
| 14.7.2 设备和材料要素.....               | 499        |
| 14.7.3 由封装材料中的放射性杂质导致的软错误.....    | 500        |
| <b>15 质量</b> .....                | <b>501</b> |
| 15.1 决定质量的因素.....                 | 501        |
| 15.2 商业过程中的质量管理方法.....            | 502        |
| 15.3 产品对用户的可用性.....               | 503        |
| <b>附录: 术语表</b> .....              | <b>509</b> |



# 1 半导体基础和历史回顾

## 1.1 简介

半导体是一种具有晶格结构的固体材料,它有一定数量的自由移动的电子或空穴,载流子的类型由晶格类型决定。电子或空穴的数量与温度有关。由于这些移动的载流子的存在,这种材料具有不同的传导率,如果我们考虑传导率的倒数,则在室温下半导体的电阻率在  $10^{-2}$  (比如砷化镓材料和砷化镓材料)欧姆厘米到  $10^6$  (比如硒)欧姆厘米数量级之间。不具备移动载流子的材料具有非常高的电阻,它们被称为绝缘体(比如:玻璃即  $\text{SiO}_2$ 、云母、琥珀、硬瓷、PVC)。某些材料即使在最低的温度下也能保持其导电性,还有一些材料在正常的环境里具有非常低的电阻,这样的材料称为导体(如铝、铜、银、金)。与固体金属材料不同的是,气体和液体的导电是由离子的运动引起的,因此其导电性取决于材料本身的电离活性。

接下来的部分专门讨论半导体元件、连接这些元件的金属连线以及把相邻元件隔开的绝缘体。综合考虑这些要素并掌握了性价比优化的制造方法,就促成了现在半导体行业的成功和高度集成化的实现,现在达到了在单个设备中包含十亿个电路单元的程度。

## 1.2 历史回顾

### 1.2.1 半导体二极管

早在 1939 年,物理学家 Walter Schottky 和 Eberhard Spenke (Siemens & Halske)发表了关于具有金属/半导体结的晶体二极管如何工作的论文“关于晶体整流器的空间电荷和表面层理论的量化解释”。他们的论文成果是建立在透彻的基础研究上的。研究表明,无论是在理论上还是在实践中,这个结均表现出整流特性,也就是说,对于正反两方向的电流,它表现出来的电阻是不同的。为了纪念肖特基的贡献,我们今天称有金属膜的半导体二极管为“肖特基势垒二极管”。

第一个整流器是由硒锗材料制造而成的。例如,在微波技术特别是在雷达工程中,从 1942 年开始使用点接触的锗二极管。在简单的无线电接收器中,二极管被用作检波元件。另一方面,硒二极管很早就被用作整流元件。

### 1.2.2 双极型晶体管

晶体管发展史上一个很重要的里程碑就是晶体管的开发,它在1945年始于由物理学家 William Shockley 领导下的贝尔实验室。1947年,与 Walter Brattain 和 John Bardeen 一起,Shockley 以多晶锗为材料构造出一种两极点接触的二极管。1947年12月16日,这个团队偶然发现,第一个二极管两端的正向电压的变化引起了第二个二极管的反向电流的变化。他们把这种效应称为“晶体管效应”,晶体管这个词由“转变”和“电阻”两个单词衍生而来。起初的工业生产很难进行,是因为器件参数分布范围太大而很难控制。这方面的改进首先出现在平面型结晶体管的开发上。这是基于 Shockley 的一个革命性的想法来实现的,在制作结时,不是通过接触的方式,而是通过在四价锗晶体中有选择性地掺入三价(如硼)和五价(如砷)材料,即通过“掺杂”来改变晶体的传导率和性质(能带结构)。他在1949年描述了这种想法,并在1950年制成了第一个 PNP 结锗晶体管。这种构造原理被称为“合金结晶体管”,因为微量硼在某种意义上是“被熔入”锗中,从冶金学的观点来说,由此产生了一种合金。

这种最早的晶体管一直使用多晶锗来制造。这种材料的缺点在于晶体结构有断层,并且杂质对传导率有影响。这种缺点在实践中只有在如下情况下才可能避免,即通过浮区提纯的革新来制造出高纯度的单晶体材料。

另外一种改进是由贝尔实验室和通用电气发明的扩散技术。这种技术是在1955年的一次座谈会上提出来的,它的优点在于层的厚度和掺杂浓度能够可靠复制。由于他们的伟大的发明以及相关的研究和开发工作,Shockley, Bardeen 和 Brattain 获得1956年的诺贝尔物理奖。

关于双极型晶体管的工作原理将在1.3.1节中详述,该节讲述集成双极型电路。

### 1.2.3 硅的成功之路

锗具有传导率高的优点,所以它尤其适用于高频环境中。另一方面,锗的缺点在于它的晶体结构在高于75℃时将产生严重的损坏。另外,即使在室温下反向电流也会产生干扰。相比而言,硅晶体则可承受150℃高温,并且由于它具有高电阻率和高带隙使得反向电流很低。除此之外,自然界的硅实际上是无限的。早在1952年,G. Teal 和 E. Buchler 就发表了第二种工艺,通过浮区提纯术从熔化的多晶硅中制造出单晶硅。今天,这种方法被称为 Czochralski 工艺(直拉工艺)。Siemens 在1953年到1956年间开发了另一种替代工艺: CVD(化学气相沉积)工艺。在这种工艺中,硅栅具有高纯度但仍是多晶硅的形式,是从气相沉积而成。据 W. G. Pfann 所说,这些硅栅通过熔化区域,在这个阶段,它们不仅被提纯且已经成为单晶体的形式。这种方法在经过无数次改进后今天仍在使用。